

Selbstentlüftung von Abwassertransportleitungen

Detlef Aigner

Einleitung

Seit über 165 Jahren, seitdem der englische Ingenieur William Lindley ab 1842 den Hamburger Siel plante und baute, hat sich die klassische Form des Abwassertransportes, der Freispiegelkanal, in Deutschland bewährt. Seit den 70'er Jahren werden immer häufiger Druckrohrleitungen für den Transport von Abwasser eingesetzt. Das geschieht vor allem aus Kostengründen aber auch topografische Gegebenheiten, komplizierte Anbindungen und die Notwendigkeit des Pumpeneinsatzes bei zu geringem oder steigendem Gefälle spielen eine Rolle. Druckrohrleitungen können für die Druck- aber auch für die Unterdruckentwässerung eingesetzt werden. Sie sind eine ökonomisch und ökologisch günstige Variante für den Abwassertransport, da sie mit einfacher Technik in „freier“ Trassierung, in geringeren Durchmessern und in üblichen Verlegetiefen realisiert werden. Probleme können durch Lufteinschlüsse, Ablagerungen und die Gefahr der Verstopfung verbunden mit den Problemen des diskontinuierlichen Abwasseranfalls auftreten. Eine Alternative bietet die Druckluftspülung oder die diskontinuierliche Luftzugabe. Widerstand gegen diese neuen Technologien entsteht aber meist durch Unsicherheit infolge Unwissenheit. Abhilfe liefern Aufklärung und wissenschaftliche Analyse. Mit einem dieser Probleme hat sich die TU Dresden vor einigen Jahren intensiver beschäftigt, dem Problem des Lufteinschlusses und des Lufttransportes.

Auslegung von Abwasserdruckleitungen

Die Planung von Abwassertransportleitungen ob nun als Freigefälledruckleitung oder für den Pumpbetrieb erfolgt auf der Grundlage der anfallenden Abwassermenge (Einwohnergleichwerte), der Randbedingungen der Trasse und der Rohrleitung, der Auswahl der Pumpen und deren Förderkennlinien, den Vorgaben und Zulagen aus

diskontinuierlichem Betrieb und Lufteinschluss, den Betriebsbedingungen, wie Spülung oder Druckluftzugaben und den Randbedingungen, wie Puffer und Einleitungsbedingung. Außerdem spielen Mindestfließgeschwindigkeiten, Reinigungstechnologien, maximale Abflussmenge, Druck- oder Unterdruckbedingungen eine Rolle. Die hydraulische Berechnung der Abwasserdruckleitung entspricht der mit Klarwasser, da der geringe Anteil der Inhaltsstoffe die hydraulischen Eigenschaften des Wassers nur gering beeinflusst. Der Planungsprozess erfolgt iterativ. Oft werden zusätzliche Verluste infolge von Lufteinschlüssen oder Ablagerungen nicht ausreichend beachtet.

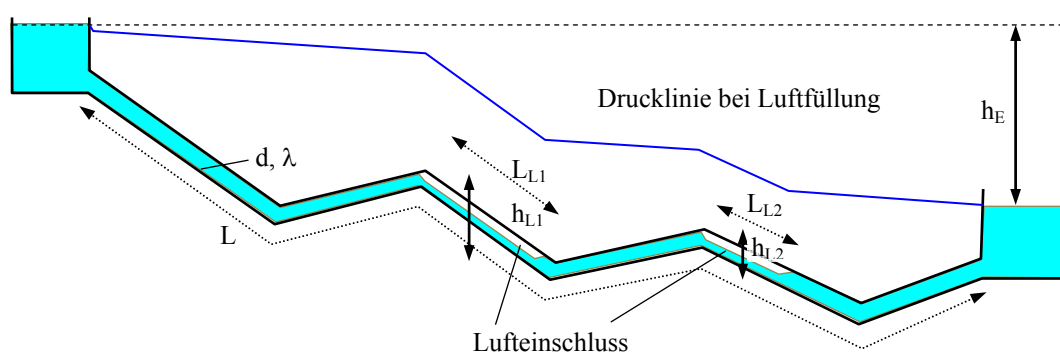


Abbildung 1 Leitung mit Lufteinschluss

Grundlage zur Berechnung von Abwasserdruckleitungen bildet das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 110, Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und –leitungen, vom September 2001. Als Fach- bzw. Lehrbücher für die hydraulische Bemessung können die Abwasserhydraulik von Hager (1994) und die Technische Hydromechanik 1 von Bollrich (2007) empfohlen werden. Im Rahmen unserer Untersuchungen entstand ein Merkblatt des sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie mit dem Titel: „Hydraulische Bemessung von Freigefälledruckleitungen zum Abwassertransport“ vom Mai 2003.

Die hydraulische Berechnung der Druckrohrströmung basiert auf der Formel von Weisbach (Bollrich, 2007):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d \cdot I_R} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_E}{\lambda \cdot L/d + \sum \zeta}} \quad (1)$$

$$\text{mit: } \lambda = \left[-2 \cdot \lg \left(\frac{2,51 \cdot \nu}{\sqrt{2 \cdot g \cdot d^3 \cdot I_R}} + \frac{k}{3,71 \cdot d} \right) \right]^{-2} \quad (2)$$

$$I_R = \frac{h_V}{L} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{näherungsweise wird gerechnet: } I_R \cong I_E = \frac{h_E}{L}$$

v – Geschwindigkeit in m/s	λ – Reibungsbeiwert
g – Erdbeschleunigung in m/s ²	I_R – Reibungsgefälle
d – Durchmesser der Rohrleitung in m	I_E – Energiegefälle
d_{hy} – hydraulischer Durchmesser in m	h_E – Energiehohle in m
r_{hy} – hydraulischer Radius in m	h_V – Verlusthohle in m
L – Länge der Rohrleitung in m	ζ - Verlustbeiwert
k – Rauigkeit in m	ν – kinematische Viskosität in m ² /s

Luft einschlüsse werden sowohl in den Druckhöhen (Drucksprunge) als auch in den Leitungslängen berücksichtigt (siehe Abbildung 1).

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot (h_E - \sum h_L)}{\lambda \cdot (L - \sum L_L) / d + \sum \zeta}} \quad (3)$$

Freispiegelbereiche innerhalb der Druckleitungen (Luftfüllung) oder bei wechselnden Druck- und Freispiegelabfluss können ebenfalls mit der Gleichung nach Darcy-Weisbach berechnet werden, wenn für den Rohrdurchmesser der hydraulische Durchmesser berücksichtigt wird:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d_{hy} \cdot I_R} \quad \text{mit } d_{hy} = 4 \cdot r_{hy} \quad (4)$$

$$\text{und } \lambda = \left[-2 \cdot \lg \left(\frac{2,51 \cdot \nu}{\sqrt{2 \cdot g \cdot d_{hy}^3 \cdot I_R}} + \frac{k}{3,71 \cdot d_{hy}} \right) \right]^{-2} \quad (5)$$

Bei stationär gleichförmigem Abfluss entspricht das Reibungsgefälle I_R dem Sohl- bzw. Leitungsgefälle I_S und in den Gleichungen (4) und (5) wird $I_R = I_S$ gesetzt. Die Formbeiwerte in Gleichung (5) für den hydraulisch glatten Bereich (2,51) und den hydraulisch rauen Bereich (3,71) wurden aus der Gleichung für Vollfüllung übernommen. Ihre geringen Veränderungen bei Teilfüllung liegen im Toleranzbereich anderer angenommener Werte, wie z.B. der Rauheit k , und können vernachlässigt werden.

Zur Ermittlung des Teilfullungsabflusses eignen sich außerdem die Teilfullungskurven auf der Basis der Manning-Strickler-Formeln.

$$\frac{Q_{\text{Teil}}}{Q_{\text{Voll}}} = \frac{A_{\text{Teil}}}{A_{\text{Voll}}} \cdot \frac{v_{\text{Teil}}}{v_{\text{Voll}}} = \frac{A_{\text{Teil}}}{A_{\text{Voll}}} \cdot \left(\frac{r_{hy, \text{Teil}}}{r_{hy, \text{Voll}}} \right)^{2/3} \quad (6)$$

Die Geschwindigkeiten und Abflüsse für die Vollfüllung können aber mit den Gleichungen (1) und (2) ermittelt werden.

Betrieb von Abwasserdruckleitungen

Wegen des über die Zeit (Tag, Woche, Monat) verteilten Abwasseranfalls erfolgt der Betrieb von Abwasserdruckleitungen diskontinuierlich. Das geschieht über das Öffnen und Schließen von Schiebern bei Freigefälledruckleitungen oder das Zu- und Abschalten der Pumpen bei Pumpendruckleitungen. Wird das ankommende Abwasser aus einem Mischwasserkanal abgeleitet, d.h. wird das Regenwasser mit abgeführt, dann sind die Erfordernisse eines Regenrückhaltebeckens für den Zwischenspeicher nach ATV-DVWK-A 117 zu berücksichtigen. Notüberläufe müssen bei Starkniederschlägen die Ableitung in die Vorflut garantieren.

Die Regelung von Freigefälledruckleitungen erfolgt meist automatisch. Dazu werden Messgeräte und Sensoren zur Durchfluss-, Druck- und Wasserstandsmessung benötigt.

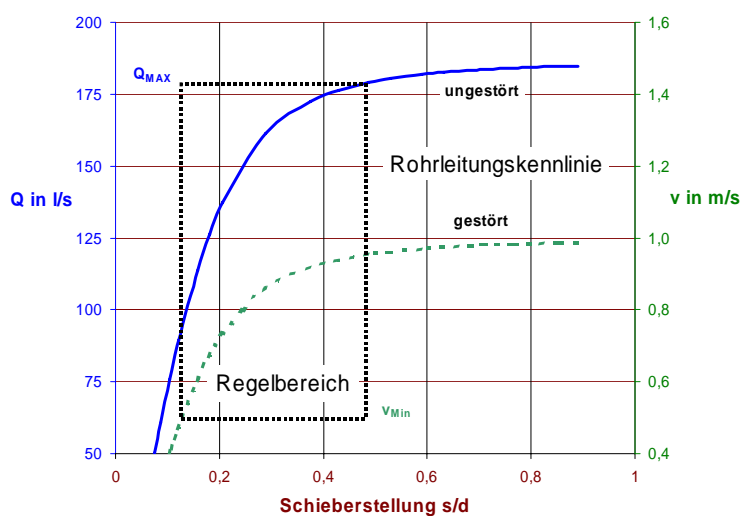


Abbildung 2 hydraulische Randbedingungen für die Regelung

Für den ablagerungsfreien Betrieb von Abwasserdruckrohrleitungen werden Mindestfließgeschwindigkeiten empfohlen. Diese liegen bei 0,5, besser aber bei 0,7 m/s. Insbesondere in der Druckentwässerung können diese Bedingungen wegen des geringen Abwasseranfalls oft nicht eingehalten werden. Die Unruhe in den Leitungen erschwert allerdings die Verfestigung von Ablagerungen. Zur Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten werden in Abwasserdruckrohrleitungen oft Druckluftzugaben vorgenommen. Spülungen und damit Reinigungen erfolgen über Druckluftspülstationen. Dazu werden Spülschächte mit Absperr- und

Einblaseeinrichtungen ausgestattet. Neben den Problemen mit Lufteinschlüssen und den Abwasserinhaltsstoffen spielen Ausgasungen und Schwefelwasserstoffbildung eine große Rolle. Standzeiten, Leitungslängen und Spülzyklen sind davon abhängig.

Selbstentlüftung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes im Auftrag des Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie wurden von 2000 bis 2002 im Hubert-Engel-Labor der Technischen Universität Dresden die Mechanismen des Luftblasentransporte in Druckrohrleitungen an eine 190 mm Plexiglasleitung untersucht.

Dazu wurden die Bewegungseigenschaften tausender Einzelblasen analysiert. Neben den Labormessungen wurde gleichzeitig die im Juni 2000 in Betrieb genommene zentrale Kläranlage Zschopau bei Chemnitz mit einer Freigefälledruckleitung zur Abwasserüberleitung wissenschaftlich begleitet.



Abbildung 3 *Modell einer Freigefälledruckleitung im Hubert-Engels-Labor*

Die Analyse der Einzelblasen lieferte wichtige Angaben zur Definition einer Formel aus dem Kräftegleichgewicht zwischen Strömungswiderstand und Auftrieb der Blase. Diese Formel bestimmt die Stillstandgeschwindigkeit einer Einzelblase in der

Rohrströmung in Abhängigkeit vom Durchmesser und der Neigung der Druckrohrleitung.

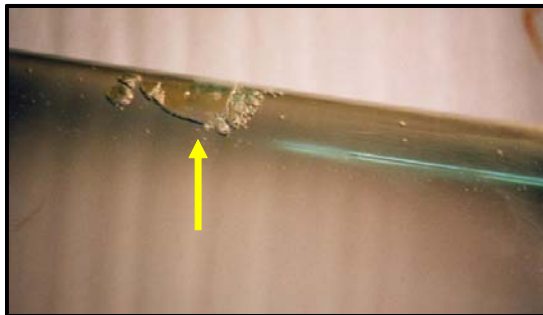


Abbildung 4 Stehende Einzelblase in der Druckrohrströmung

Die so genannte Stillstandsgeschwindigkeit v_s einer Einzelblase in der Rohrleitung mit dem Durchmesser d und der Neigung α definiert den Beginn der Bewegung einer mittleren, schwer beweglichen Blase. Größere und kleinere Blasen erfordern geringere Strömungsgeschwindigkeiten für Ihre Mitnahme mit der Strömung. Bereits Gandenberger (1957) machte auf dieses Phänomen aufmerksam. Er definierte eine Blase mit dem dimensionslosen Zahl $n = V_B/(\pi/4 \cdot d^3)$ aus dem Verhältnis des Blasenvolumens und einem Rohrzylinder der Länge d . Seine Blasen zeigten bei einer dimensionslosen Größe von $n=1$ bis $1,5$ die größten Widerstände. In unseren Untersuchungen waren es die Blasen mit der Größe $n=0,41$. Unter Berücksichtigung diese Extremwertes und weiterer Kennwerte entstand die Formel (7) für die so genannte Stillstandsgeschwindigkeit einer Luftblase in der Rohrströmung.

$$v_s = \sqrt{1,5 \cdot g \cdot \frac{d \cdot \sin \alpha}{(1,64 \cdot \sin \alpha + 0,06)}} \quad \alpha - \text{Neigungswinkel der Rohrleitung} \quad (7)$$

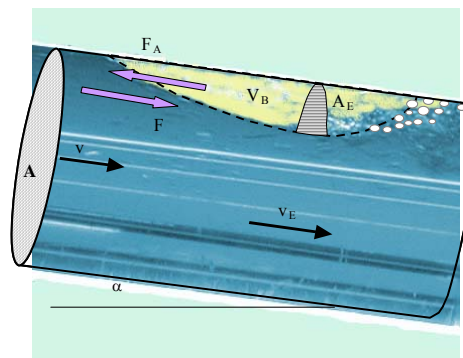


Abbildung 5 Kräftegleichgewicht an der Einzelblase

Für Druckleitungen im Abwasserbereich aber auch im Klarwasserbereich mit geringem Luftabschluss und keiner weiteren Luftzufuhr kann aus dem Vergleich der vorhandenen Fließgeschwindigkeit mit der berechneten Selbstentlüftungsgeschwindigkeit die Möglichkeit der selbstständigen Entlüftung ermittelt werden.

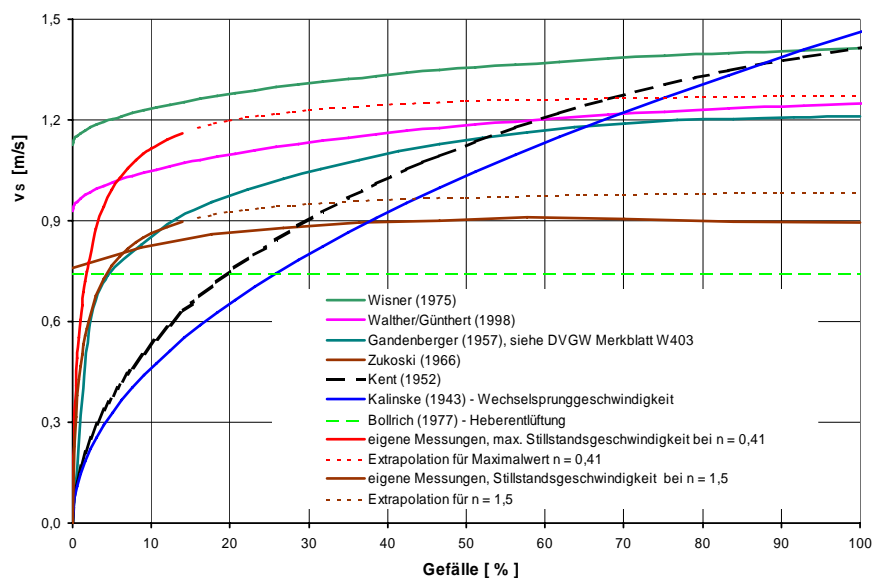


Abbildung 6 Vergleich der Selbstentlüftungsgeschwindigkeiten für $d=190$ mm

Dauer des Luftaustrages

Um eine Aussage über die erforderliche Zeit zum Austrag eines bestimmten Luftvolumens zu machen, wurden zeitabhängige Messungen im Hubert-Engels-Labor durchgeführt. Dabei wurden das Gefälle der Rohrleitung und das eingeschlossene Luftvolumen variiert. Der Austrag der Luft wurde über einen längeren Zeitraum gemessen und daraus der Austragsluftvolumenstrom ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen variierten sehr stark, zeigten aber eine gewisse Tendenz. Die daraus ermittelte Gleichung des relativen Luftvolumenstromes β gestattet die Abschätzung der selbstständigen Entlüftungszeit.

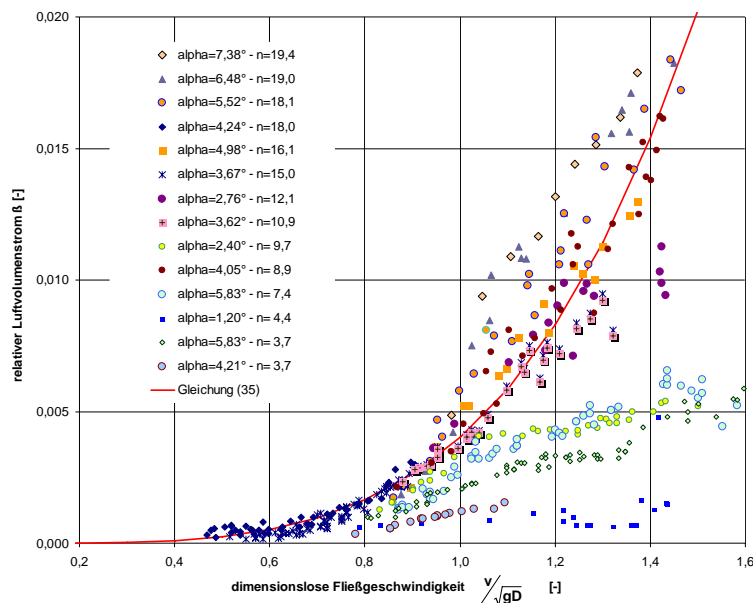


Abbildung 7 Luftaustrag $\beta = Q_L/Q_W$ als Funktion der dimensionslosen Fließgeschwindigkeit

Zusammenfassung

Abwasserdruckrohrleitungen stellen eine kostengünstige Alternative zu Freispiegelleitungen dar und sind bei richtiger Berücksichtigung der Randbedingungen auch beherrschbar. Die durch Druckluftspülung bewusst eingetragene Luft oder durch den normalen Betrieb mittransportierte Luft kann die Abwasserströmung behindern oder ganz verhindern. Deshalb ist es erforderlich bei der Bemessung von Abwasserdruckleitungen diesen Lufteinschluss zu berücksichtigen. In Abhängigkeit vom Durchfluss und damit von der Geschwindigkeit der Abwasserströmung sowie vom Durchmesser und dem Leitungsgefälle kann es zum Luftaustrag kommen. Das ist der Fall, wenn das Energieliniengefälle größer als das Leitungsgefälle ist. Ist das nicht der Fall, dann wird die Luft nur weitertransportiert, wenn die Fließgeschwindigkeit v bei Vollfüllung größer als die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit v_S nach Gleichung (7) ist. Diese an der TU Dresden entwickelte Formel ordnet sich gut in die bisher durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen zu diesem Thema ein. Bei kürzeren Förderzyklen reicht die Zeit allerdings oft nicht aus, um Lufteinschlüsse vollständig auszutragen, deshalb wird der hydraulische Nachweis unter Berücksichtigung von Lufteinschlüssen in Abwasserdruckleitungen empfohlen. Kritischer Bemessungsfall ist die vollständige Luftfüllung aller fallenden Rohrabschnitte in denen das Gefälle I_S größer als das Energiegefälle I_E der gefüllten Leitung ist.

Literatur

- Aigner, D.:** Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung, KA Korrespondenz Abwasser 47 (2000) Nr. 6, S. 876-881, Info siehe: www.d-aigner.de
- Aigner, D.; Thumernicht, S.:** Geregelt Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung. Wasserbauliche Mitteilungen Heft 21, TU Dresden, 2002
- Aigner, D.:** Hydraulische Bemessung von Freigefälledruckleitungen zum Abwassertransport. Merkblatt des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. Mai 2003. <http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/FGDL-Merkblatt2.pdf>
- ATV-A 118:** Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Arbeitsblatt der Abwassertechnischen Vereinigung, November 1999
- ATV-DVWK-A 110:** Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen. Regelwerk, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, September 2001
- ATV-DVWK-A 117:** Bemessung von Regenrückhaltebecken. Regelwerk, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 2001
- Bollrich, Gerhard:** Technische Hydromechanik I, 5. Auflage. Verlag für Bauwesen Berlin 2000
- DVWG-Merkblatt W 403:** Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Eschborn Jan. 1988
- Gandenberger, W.:** Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung von Fernwasserleitungen, GWF Wasser, Abwasser 1957 Nr. 4, S. 206
- Hager, W. H.:** Abwasserhydraulik Theorie und Praxis, 1994
- Volkart, Peter:** Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme. Mitt. Nr. 30 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1978
- Wackernagel, G.; Schmidt, H.; Aigner, D.; Thumernicht, S.:** Geregelt Freigefälledruckleitung zur Abwasserüberleitung. KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48 (2001) Nr.6, S. 844-847, Info siehe: www.d-aigner.de
- Walther, G. ; Günthert, F. W. :** Neue Untersuchungen zur Selbstentlüftungsgeschwindigkeit in Trinkwasserleitungen. gwf Wasser-Abwasser, 139 (1998) Nr. 8, S. 475-481. <http://www.unibw.de/ifw/swa/veroeffentlichungen>
- Wisner, P.E. et al.:** Removal of air from water lines by hydraulic means, Journ. of the hydraulic division, Proc. ASCE 101 HY2, 1975, S. 243-257

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Aigner
wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
an der Technische Universität Dresden
Laborleiter im Hubert-Engels-Labor
Tel.: 0351 46334725
E-Mail: detlef.aigner@tu-dresden.de
www.iwd.tu-dresden.de